

# Messung der Lufttemperatur und Luftfeuchte unter Berücksichtigung des Strahlungsfehlers auf einem Versuchsgelände

S. Schienbein und K. Arnold

## Zusammenfassung:

Zur Validierung des Verfahrens der akustischen Tomographie, das als Fernerkundungsverfahren trägheits- und berührungslos arbeitet, werden Vergleichsmessungen mit herkömmlichen Sensoren für die Lufttemperatur und Luftfeuchte durchgeführt. Dabei zeigen sich die Grenzen der Erfassung dieser Größen in Bezug auf Strahlungseinfluss und Trägheit der Messgeräte. Hier werden einige Probleme bei der Verwendung konventioneller Hütten und Lösungsvorschläge aufgezeigt.

## Summary:

In order to validate measurements with the acoustic tomography, which operates as a remote sensing system lagless and contactless, comparison measurements were performed with conventional sensors for the air temperature and humidity. The accuracy of these quantities is limited by the radiation influence and the lag of the instruments. Here some difficulties are pointed out by using conventional shelters and solutions are demonstrated.

## 1. Einleitung

Das am Leipziger Institut für Meteorologie entwickelte Verfahren der akustischen Tomographie nutzt die Laufzeit von ausgesendeten Schallsignalen zwischen mehreren Sendern und Empfängern aus, um daraus meteorologische Parameter wie die Lufttemperatur oder das Windfeld zu bestimmen. Die Schallsender und -empfänger sind im Gelände so verteilt, dass aus der tomographischen Invertierung flächenhafte Verteilungen der entsprechenden Größen gewonnen werden können. Zur Validierung dieser Daten werden parallele Messungen mit konventionellen Sensoren, die mit möglichst hoher Genauigkeit und trägheitsarm die entsprechenden Parameter bereitstellen, benötigt.

Seit dem Betreiben von Messnetzen benutzen Meteorologen für die Messung von Lufttemperatur und -feuchte Wetterhütten, die baugleich gestaltet sind und durch eine spezielle Konstruktion, eine von der direkten Sonnenstrahlung unbeeinflusste Messung der Lufttemperatur gewährleisten sollen. In den letzten Jahrzehnten sind mit den neuen Sensoren auch eine Vielzahl von kleineren Hütten entstanden, die für die Messung der strahlungsgeschützten Temperatur eingesetzt werden. Besonders wenn unterschiedliche Messverfahren in Anwendung kommen, macht sich der immer noch unzulängliche Strahlungsschutz und die Trägheit des Messfühlers bemerkbar. Da die akustische Tomographie als ein indirektes Fernerkundungsverfahren die virtuelle Lufttemperatur trägheits- und berührungslos bestimmt, ist es für einen Vergleich mit konventionellen Sensoren besonders wichtig, die Trägheit und den Strahlungsschutz zu optimieren.

Will man Temperaturänderungen auf dem Versuchsgelände mit einer Ausdehnung von  $300 \times 300 \text{ m}^2$  bezüglich der lokalen Unterschiede und der zeitlichen Veränderung betrachten, müssen die Temperatursensoren eine Genauigkeit von  $\pm 0,1 \text{ K}$  besitzen und zusätzlich zum Strahlungsschutz auch rasch reagieren, um Schwankungen innerhalb einer Minute noch anzuzeigen. In den nachfolgenden Ausführungen soll über einen Vergleich von Temperaturmessun-

gen in einer Young-Hütte und einer Stevenson-Hütte, über das Trägheitsverhalten und Temperaturmessfehler in einer ventilierten Young-Hütte und über die Erprobung einer neuen ventilierten Hütte berichtet werden.

## 2. Vergleich von Temperaturaufzeichnungen in der Young-Hütte und in der Stevensonhütte

Am Institut für Meteorologie der Universität Leipzig laufen bereits mehrere Jahre Aufzeichnungen der verschiedensten meteorologischen Messgrößen. Insbesondere werden Minutenmittelwerte der Lufttemperatur in einer Young-Hütte und in einer Stevenson-Hütte in 2 m über dem Boden und etwa 3 m horizontal entfernt aufgezeichnet. Diese Aufzeichnungen wurden über einen Zeitraum von 2 Jahren verglichen und ergaben folgende Ergebnisse:

Im Vergleich der einzelnen Minutenmittelwerte finden wir zum Teil erhebliche Abweichungen. Im Tagesmittel aller 1440 Messwerte sind die Unterschiede sehr gering (unter der Fehlergrenze von 0,1 K). Diese Erkenntnis ergibt sich aus der Auswertung aller Differenzen von Minutenmittelwerten aus der Young-Hütte und der Stevenson-Hütte über den Tag. Von jedem Tag wurden die größten negativen und positiven Abweichungen ermittelt und dann noch über den Monat gemittelt. In der Tabelle 1 sind die über den Monat gemittelten Abweichungen der Tagesmittel, der größten negativen Abweichung während eines Tages von dem Messwert der Young-Hütte und der größten positiven Abweichungen eines Tages von dem Messwert der Young-Hütte eingetragen.

Tab. 1 Vergleich der Abweichungen von Temperaturmessungen in der Stevenson-Hütte und Young-Hütte

Monat	Tagesmittelabw.	Mittel neg. Tagesabw.	Mittel pos. Tagesabw.
Jan 99	0,031	- 0,39	0,35
Feb 99	0,002	- 0,45	0,32
Mär 99	0,005	- 0,47	0,49
Apr 99	0,003	- 0,62	0,59
Mai 99	- 0,075	- 1,02	0,79
Jun 99	- 0,070	- 0,86	0,77
Jul 99	- 0,076	- 0,97	0,84
Aug 99	- 0,060	- 0,84	0,83
Sep 99	- 0,017	- 0,73	1,34
Okt 99	- 0,008	- 0,59	0,51
Nov 99	0,016	- 0,33	0,35
Dez 99	0,036	- 0,29	0,32
Jan 00	0,027	- 0,29	0,28
Feb 00	0,020	- 0,38	0,32
Mär 00	- 0,002	- 0,50	0,35
Apr 00	- 0,020	- 0,62	0,69
Mai 00	- 0,111	- 0,96	0,78
Jun 00	- 0,089	- 0,98	0,67
Jul 00	- 0,061	- 0,66	0,48
Aug 00	- 0,090	- 0,86	0,80
Sep 00	- 0,026	- 0,63	0,75
Okt 00	- 0,015	- 0,58	0,57
Nov 00	0,017	- 0,48	0,44
Dez 00	0,019	- 0,33	0,34

### 3. Trägheitsverhalten von ventilierten Young-Hütten

Für die ersten Feldexperimente, die dem Vergleich mit der akustischen Tomographie dienten, wurden im Eigenbau entwickelte Thermoelemente zunächst in Strahlungsschutzrohren (Schienbein und Arnold, 1996) und später in Young-Hütten eingebaut (Raabe u. a., 2000). Die aktive Lötstelle bestand aus 5 cm langen Drähten aus Konstantan und Eisen (0,2 mm Durchmesser). Die weitere Leitungsführung erfolgte in einem Aluminiumrohr 10x1 mm, welches in den Schaft der Young-Hütte eingepasst wurde. Der Wärmeübergang von der Luft an die aktive Lötstelle wurde durch einen Ventilator am oberen Ende der Young-Hütte verbessert.

Die Trägheit des Systems wird hauptsächlich vom Wärmeübergang von der Luft an den Sensor und von der Wärmeleitung über die Halterung an den Sensor bestimmt. Weiterhin spielt die Masse der Strahlungsschutzlamellen eine Rolle, durch die die Umgebungsluft strömt. Die Auflösung der Temperaturänderungen und die Trägheit des Systems waren bereits zufriedenstellend, jedoch konnten die Strahlungsfehler immer noch festgestellt werden.

Für die exakte Ermittlung der Trägheit des gesamten Systems wurden spezielle Versuche durchgeführt. Die Hütte mit dem Temperatursensor wurde in einem Klimaschrank auf eine Temperatur von etwa 7 °C abgekühlt und der Temperaturverlauf durch Aufzeichnung aller Sekunden verfolgt, nachdem die Hütte mit dem Sensor im Laborraum ohne Ventilation der Umgebung oder in einen Luftstrom mit 2,2 m/s den neuen Bedingungen ausgesetzt wurde. Aus den Temperaturverlaufskurven konnten die Trägheitsbeiwerte für die verschiedenen Phasen berechnet werden. In Abb. 1 ist der Temperaturverlauf und eine berechnete Trendlinie aus diesen Werten dargestellt.

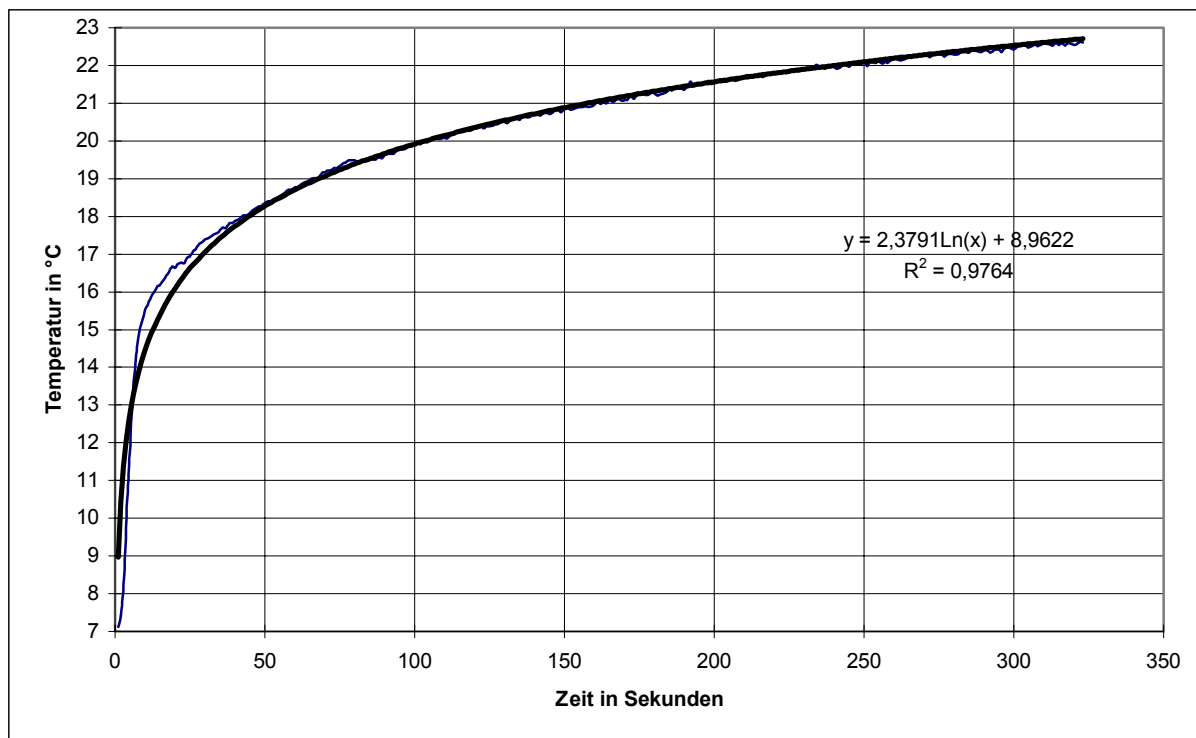


Abb. 1: Temperaturverlauf und Trendlinie (fett) bei 2,2 m/s Anströmgeschwindigkeit.

Der Verlauf der Trägheitskonstanten ist in Abb. 2 dargestellt. Die „Trägheitskonstante“ sollte für eine Messeinrichtung eine Konstante sein, in diesem Falle ist sie es nicht, da offensichtlich in der ersten Phase der Angleichung die geringe Wärmekapazität der exponierten Messdrähte und in der zweiten Phase die hohen Wärmekapazitäten der massiven Halterung und der Lamellen wirken. Die gesamte Hütte braucht einige Minuten, bis sie auch bei 2,2 m/s Anströmgeschwindigkeit die Umgebungstemperatur erreicht.

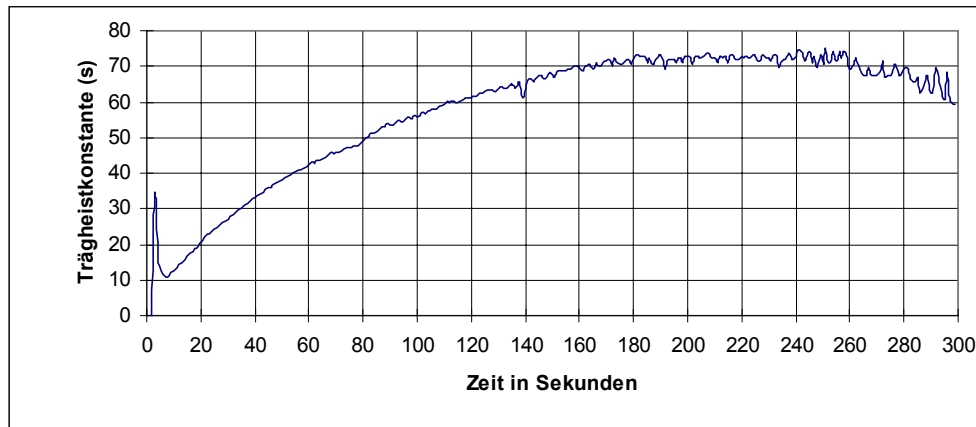


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf der Trägheitskonstante.

#### 4. Temperaturfehlanzeige durch die Ventilatorenwärme bei ventilierten Young-Hütten

Für den Vergleich der Messergebnisse aus der Schallausbreitung und der mit Thermoelementen ermittelten Temperaturen traten auch nachts Differenzen auf, die nicht sofort erklärt werden konnten. Eine Hypothese läuft darauf hinaus, dass die ventilierten Young-Hütten einer Eigenerwärmung durch den Ventilationslüfter unterliegen. Um diesen Sachverhalt nachzuprüfen, wurden Vergleichsversuche angestellt.

Der Temperaturverlauf von zwei in gleicher Raumhöhe in 70 cm Entfernung aufgestellter Hütten ist in Abb. 3 dargestellt. Zum Zeitpunkt 1 wurde der Ventilator der Hütte 1 in Betrieb genommen, beim Zeitpunkt 2 jener der Hütte 2. In beiden Fällen steigen die angezeigten Temperaturen um jeweils 0,3 K sofort und dann mit einer Verzögerung von einer halben Stunde um weitere 0,1 K an.

Zum Zeitpunkt 3 wurde der Ventilator der Hütte 1 wieder ausgeschaltet. Die Temperatur sinkt wieder auf den ursprünglichen Wert ab, wogegen die Temperatur an der Hütte 2, wo der Ventilator noch läuft, auf dem höheren Wert verharret. Es dauert aber etwa 3 Stunden, bis der Ausgangswert bei der Hütte 1 erreicht worden ist (Zeitpunkt 4).

Der in Abb. 3 dargestellte Temperaturverlauf hat sich bei völliger Luftruhe im Laborraum ergeben. Interessant wäre nun, wie groß der Einfluss der Ventilationswärme bei geringen Windgeschwindigkeiten ist. Zur Ermittlung dieses Zusammenhanges wurden 2 Hütten in den Luftstrahl eines Windkanals gebracht und die Temperaturbedingungen ebenfalls über einige Zeit gemessen. Es ergeben sich die in Abb. 4 dargestellten Messwerte.

Zum Zeitpunkt 1 wurde der Ventilator von der Hütte 1 angeschaltet (Hütte 2 wurde während des gesamten Versuches unventiliert betrieben), ab 2 erfolgte die Umströmung der ventilierten Hütten im Windkanal mit 2,5 m/s und ab 3 mit 1,1 m/s. Zum Zeitpunkt 4 wurde die Ventilation der Hütte 1 ausgeschaltet. Der Temperatursprung der Hütte 2 zum Zeitpunkt 2 ergibt sich durch die Lufterwärmung bei der Inbetriebnahme des Windkanals.

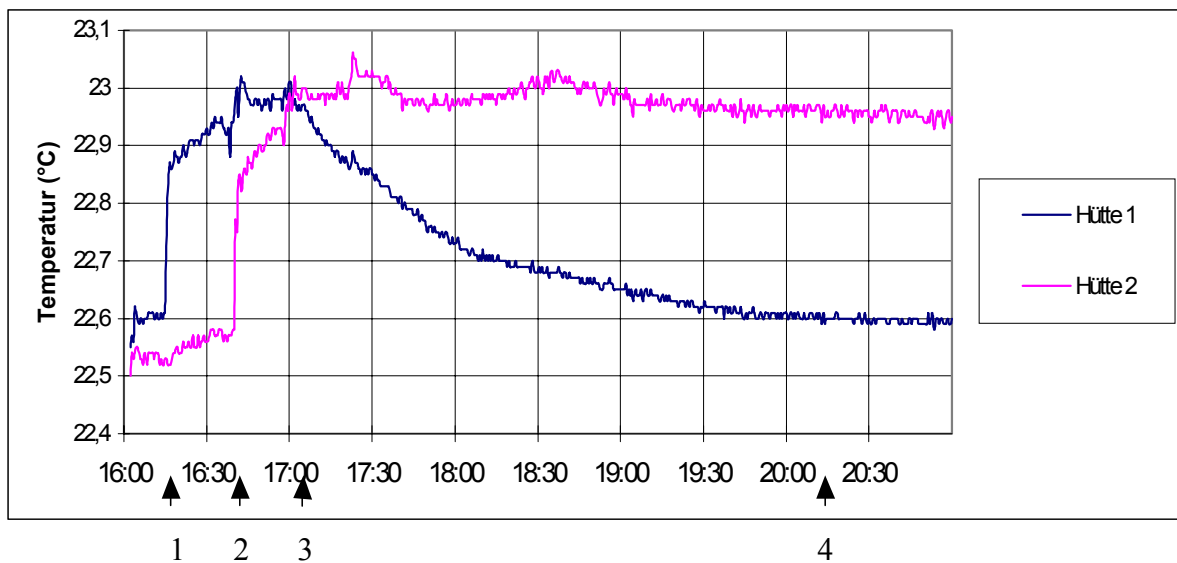


Abb. 3 : Effekte durch Ventilatorwärme.

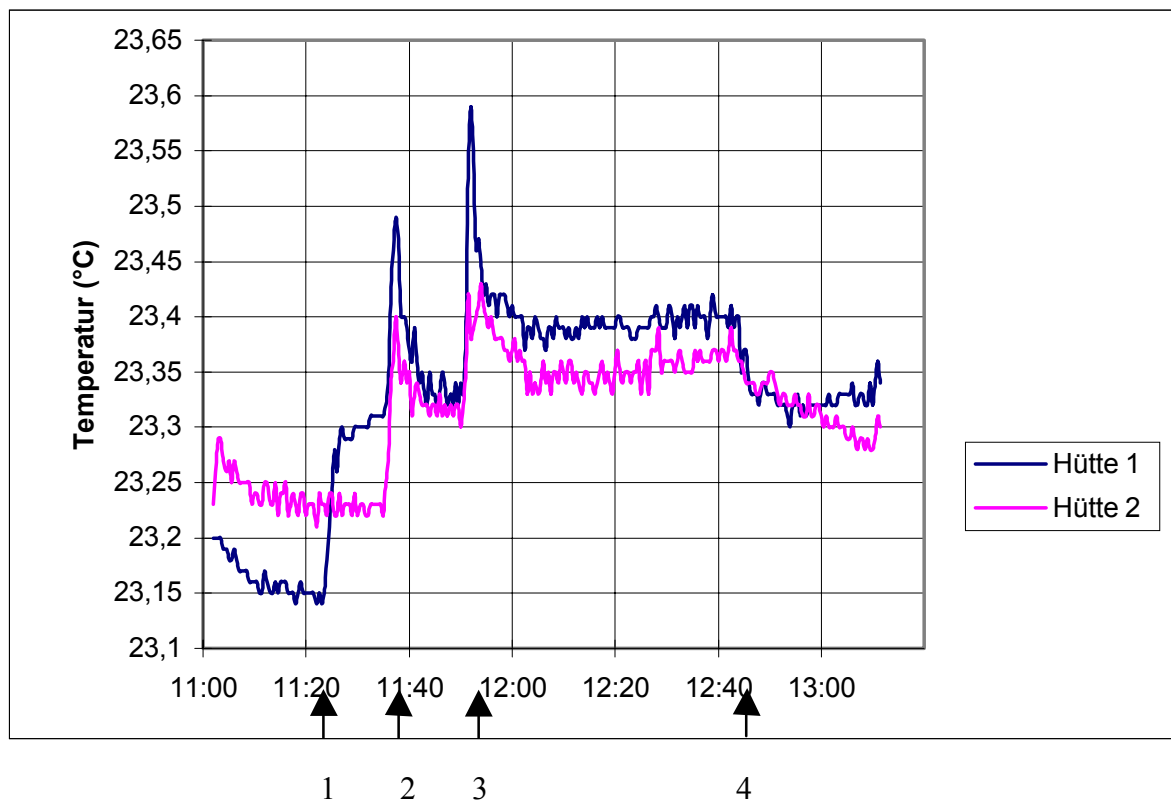


Abb. 4 : Vergleich der Hütten im Windkanal, 2 Geschwindigkeiten der Ventilation.

Aus dieser Aufzeichnung ist zu entnehmen, dass bei Ventilation mit 2,5 m/s die Unterschiede in der Anzeige verschwinden und bei 1,1 m/s gerade noch festgestellt werden können. Insgesamt muss darauf hingewiesen werden, dass diese Effekte sich im Bereich von einigen Zehntelgraden abspielen und Störungen des Temperaturverlaufs auch durch das Betreten des Laborraumes entstanden sind.

## 5. Bau von ventilierten Hütten

Nach Feststellung der genannten Unzulänglichkeiten bei der Temperaturmessung für die bestehende Aufgabe zum Vergleich mit den Messergebnissen der akustischen Tomographie haben sich die Autoren entschlossen, handelsübliche Sensoren mit einer ausreichenden Ventilation einzusetzen. Bei dem Aspirationspsychrometer von Assmann sind bereits 2,5 bis 3 m/s am Thermometer üblich. Diese Ventilationsgeschwindigkeit sollte auch an den HUMITTER-Fühlern der Firma VAISALA herrschen. Dafür wurde ein HUMITTER 50Y in ein poliertes Edelstahlrohr so eingebaut, dass die Sonnenstrahlung nicht

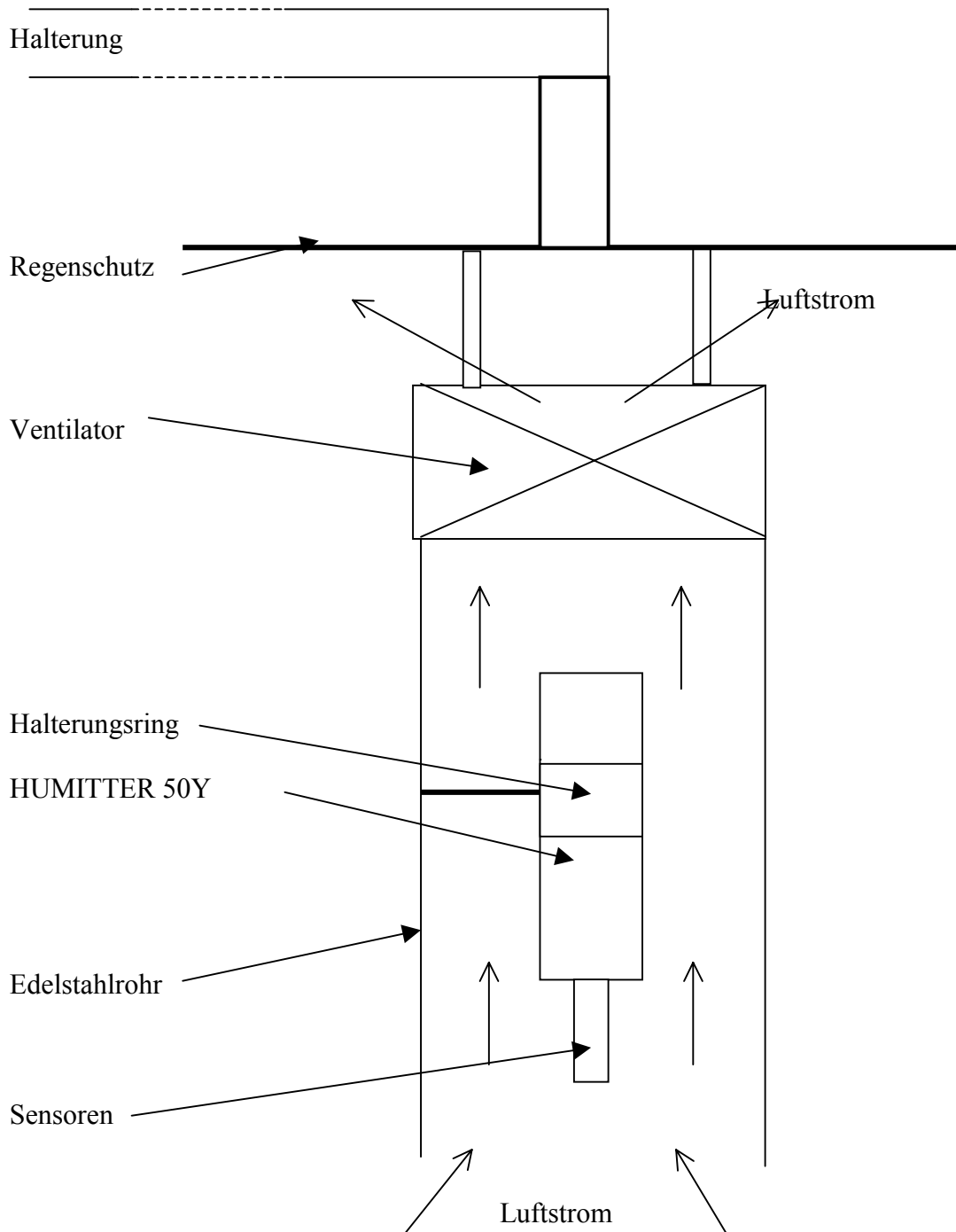


Abb. 5 : Schematischer Aufbau eines HUMITTER-Fühlers mit Ventilation.

direkt auf den Sensor treffen kann (s. Abb. 5). Am oberen Ende der Halterung ist ein Ventilator angebracht, der auch mit einer Batterie angetrieben werden kann und eine Strömungsgeschwindigkeit um den Messfühler von 3 m/s garantiert. Die Luft wird an die Umgebung befördert und die Eigenwärme nicht mehr mit dem Messfühler in Berührung gebracht.

Abb. 6 zeigt einen ventilierten HUMITTER-Fühler als Ausleger zur Erfassung der Temperatur und relativen Feuchte in 2 m Höhe über dem Boden von außen, Abb. 7 diesen Fühler von unten gesehen, wobei die Sensoren ohne Schutzkappe zu erkennen sind.



Abb. 6 : Ventilierter HUMITTER-Fühler



Abb. 7 : Ventilierter HUMITTER-Fühler - von unten gesehen

## 6. Untersuchungen an neuen ventilierten Hütten

### 6.1 Trägheit der Sensoren

Die Überprüfung der Trägheitskonstanten der Sensoren HUMITTER 50Y und die eines Thermoelementes erfolgte wie folgt. Alle Messfühler wurden in einen Klimaschrank auf Ausgangswerte von 10°C und 95 % Feuchte gebracht und dann im Laborraum bei einer Ventilation mit 3 m/s den neuen Bedingungen ausgesetzt. In den ersten Sekunden sind die Messwerte nicht zu verwenden, da durch die Umbauten keine regulären Bedingungen herrschten. In Abb. 8 wurde der zeitliche Verlauf der berechneten Trägheitswerte dargestellt. Die Trägheitskonstante des HUMITTER 50Y stellt sich für die Feuchte bei 5 Sekunden und für die Temperatur bei 7 Sekunden ein. Der Thermoelementfühler zeigt wieder eine ansteigende Tendenz auf, ist

zu Beginn der Exposition im Luftstrom bei 3 Sekunden, um nach 30 Sekunden auf 12 Sekunden anzusteigen.

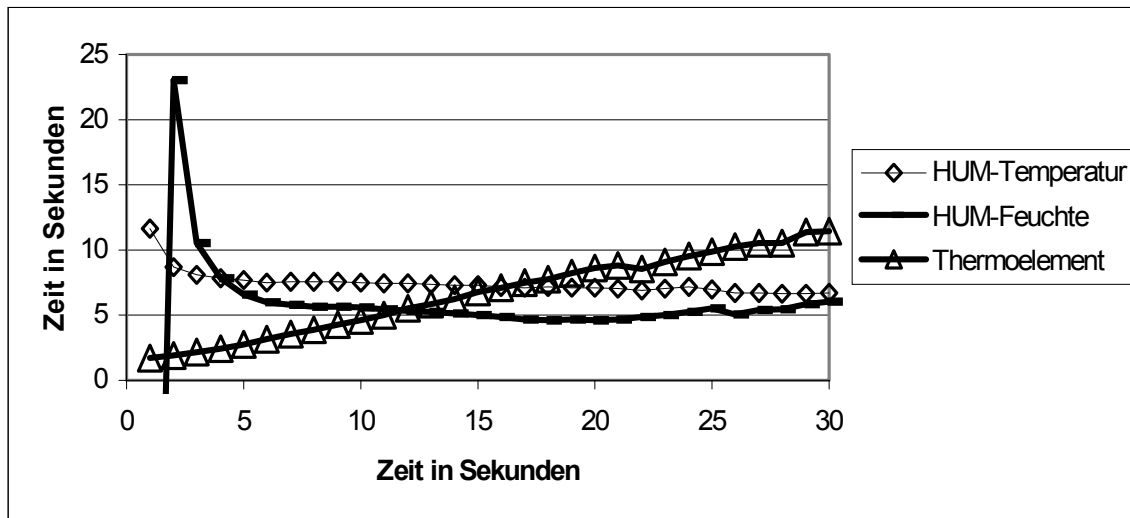


Abb. 8 : Trägheitskonstanten von HUMITTER 50Y – Fühlern und eines Thermoelementes.

## 6.2 Messwertvergleiche

Für die Ermittlung der Temperatur und Feuchte auf dem Versuchsgelände kommt es neben der absoluten Genauigkeit auch auf die relative an, wenn zwischen den einzelnen Messpunkten Unterschiede festgestellt werden sollen. Für die Bestimmung der absoluten Abweichungen von einem Normal-Pt100-Thermometer wurden die Geräte in einen Klimaschrank über einige Stunden bei Temperaturen von 10 bis 30 °C verglichen. Die ermittelten Korrekturen, die sich insbesondere durch die 100 m langen Übertragungsleitungen ergeben haben, sind im Datenloggerprogramm berücksichtigt worden. Danach erfolgte ein weiterer Vergleich, dessen Ergebnisse in Tabelle 2 wiedergegeben sind:

Tab. 2 Vergleich von HUMITTER 50Y-Fühlern mit Normalen

	Normal	Fühler1	Fühler 2	Fühler 3	Fühler 4
Temperatur °C	10,35	10,34	10,39	10,35	10,36
	30,10	30,09	30,08	30,08	30,05
rel. Feuchte %	38,7	39,3	38,6	38,3	39,0

Neben diesem Laborvergleich erfolgte auch eine Erprobung von 4 ventilierten Hütten über einen Zeitraum von 9 Tagen auf dem Messfeld des Instituts für Meteorologie. Dabei wurden wie für den Einsatz zum Vergleich mit der akustischen Tomographie ein Messwert pro Sekunde erfasst und Mittelwerte aller 30 Sekunden aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Messwerte wurden untereinander verglichen. Die Mittelwerte aus den 5041 Vergleichen sind der Tabelle 3 zu entnehmen:



Tab. 3 Vergleich von ventilierten Hütten untereinander

		Hütte 1	Hütte 2	Hütte 3	Hütte 4
Temperatur	°C	18,14	18,18	18,12	18,16
rel. Feuchte	%	69,5	68,4	68,4	69,1

Aus den Vergleichen im Labor und unter Feldbedingungen, wo jeweils die vorgesehene Leitungen für die Übertragung der Messwerte zum Datenlogger in 100 m Entfernung mit eingesetzt wurden, können die Messunsicherheiten mit 0,05 K für die Temperatur und 1 % für die relative Feuchte angegeben werden.

## 7. Zusammenfassung

Die Verwendung von trägheitsarmen Sensoren mit geringen Wärmeübergängen an den Halterungen und die Sicherstellung einer ausreichenden zielgerichteten Ventilation lässt die messtechnische Erfassung der Lufttemperatur und der relativen Feuchte auf einem Versuchsfeld mit speziell kalibrierten Sensoren zu, deren Fehler unter einem Zehntelgrad bei einem Temperaturvergleich und 1 % bei der relativen Feuchte betragen. Die Trägheit ist geringer als bei den bisher eingesetzten Messfühlern. Der Strahlungsfehler ist durch die unzureichende Oberflächenbehandlung leider immer noch vorhanden, ein doppelter Strahlungsschutz wie beim Aspirationspsychrometer könnte auch diesen Fehler noch vermindern.

## Literatur

Raabe, A., Arnold, K. & Ziemann, A. 2000: Akustische Tomographie auf dem GM Falkenberg. *Abschlußbericht Inst. f. Meteorologie der Universität Leipzig, März 2000*

Schienbein, S. & Arnold, K. 1996: Konzeption und Aufbau einer Meßeinrichtung für die Erfassung von Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten bis 12 m Höhe. *Wiss. Mitt. Inst. f. Meteorol. Univ. Leipzig u. Institut f. Troposphärenforschung Leipzig*, **4**, 124-130

## Adresse der Autoren:

Sigurd Schienbein, Klaus Arnold  
Universität Leipzig, Institut für Meteorologie  
Stephanstr. 3  
04103 Leipzig